ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY

УДК 602.807.2
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-41-49

Научная статья

EDN: WDNKXY

Оценка влияния системы орошения на этапе подготовки продуктов железорудного концентрата

И.Ю. Курносов ✉, **А.Э. Филин**, **С.В. Тертычная**
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Российская Федерация
✉ kurnosovilya@yandex.ru

Аннотация

Введение. Вредные компоненты рудной пыли, образующейся при разгрузке продуктов подготовки железорудного концентрата (ППЖК) на стадии смешивания, наносят ущерб как работникам, так и оборудованию. Для решения этой проблемы применяется орошение жидкостным аэрозолем с использованием форсунок больших диаметров (>20 мкм). Однако данный метод неэффективен в улавливании мелкодисперсных частиц пыли, поэтому повышение эффективности метода осаждения орошением пыли ППЖК становится актуальной задачей. Целью данного исследования является изучение воздействия технологии «Сухой туман», генерирующей капли жидкости размером до 20 мкм, на этапе разгрузки ППЖК горно-металлургического предприятия при осаждении взвешенной мелкодисперсной пыли. Основной задачей данного исследования являлась оценка эффективности и возможных преимуществ применения технологии «Сухой туман» для орошения пыли с последующим осаждением, поскольку к пыли ППЖК описанная выше технология ранее не применялась.

Материалы и методы. Эксперимент по осаждению пыли ППЖК проводился в специально созданном лабораторном стенде. Посредством физического моделирования были получены параметры процесса осаждения. Далее полученные результаты подвергались анализу с точки зрения получения зависимости осаждения пыли с течением времени с учетом влияния технологии «Сухой туман». Для физического моделирования была разработана программа эксперимента. Согласно данной программе, пыль равномерно загружалась внутрь лабораторного стенда (сверху), распределялась в воздушном потоке по всему объему стенда крыльчаткой, а прибор, расположенный в нижней части, фиксировал изменение концентрации во времени. Далее были проведены эксперименты по осаждению пыли с применением жидкостного орошения. Совместно с загрузкой пыли в объем лабораторного стенда посредством форсунок, генерирующих капли размером 10 и 15 мкм, подавалась жидкость — отфильтрованная вода. Эффективность технологии «Сухой туман» при осаждении пыли ППЖК определялась визуально, и далее — на основании сопоставления графиков. Изучалась динамика изменения усредненных концентраций пыли от времени как при осаждении без орошения, так и с применением технологии «Сухой туман». В процессе эксперимента фиксировались характеристики микроклимата внутри лабораторного стенда (влажность, температура и скорость движения воздуха) и параметры двух форсунок — их рабочее давление и время распыления подаваемой жидкости.

Результаты исследования. Сравнение результатов эксперимента показало уменьшение времени осаждения на 40 % и 75 % при использовании форсунок на 10 мкм и 15 мкм соответственно.

Обсуждение и заключение. По результатам эксперимента подтверждена эффективность технологии «Сухой туман» для осаждения пыли ППЖК при разгрузке на стадии смешивания. Полученные базисные результаты позволят в дальнейшем оценить эффективность осаждения пыли с применением дополнительно режима пульсирующей вентиляции. В таком сочетании ожидается повышение эффективности осаждения еще на 20–25 % относительно результатов, представленных в данной статье. Полученные результаты дают возможность обосновать рациональные параметры и применить на производстве вышеописанный способ для повышения эффективности осаждения пыли. Помимо этого, они создают основу для разработки методики ускорения осаждения пыли ППЖК с применением метода пульсирующей вентиляции.

Ключевые слова: рудничная пыль, пыль продуктов подготовки железорудного концентрата, железорудный концентрат, жидкостное орошение, массоперенос, эксперимент по осаждению, жидкостный аэрозоль, пылеводяной аэрозоль, метод пульсирующей вентиляции

Благодарности. Авторы благодарят редакционную команду журнала и рецензента за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи. Также авторы благодарят коллектив и руководителя кафедры «Техносферная безопасность» НИТУ МИСИС за поддержку в создании лаборатории и реализации исследований.

Для цитирования. Курносов И.Ю., Филин А.Э., Тертычная С.В. Оценка влияния системы орошения на этапе подготовки продуктов железорудного концентрата. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):41–49. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-41-49

Original article

Assessment of the Spraying System Impact at the Preparation Stage of Iron Ore Concentrate Products

Ilya Yu. Kurnosov ✉, **Aleksandr E. Filin** , **Svetlana V. Tertychnaya**
National University of Science and Technology (MISiS), Moscow, Russian Federation
✉ kurnosovilya@yandex.ru

Abstract
Introduction. Harmful components of ore dust, formed during the unloading of products in the preparation of iron ore concentrate (PPIOC) at the mixing stage, cause damage to both workers and equipment. To address this issue, liquid aerosol spraying using nozzles with large diameters (>20 µm) is used. However, this method proves ineffective in capturing fine-dust particles. Therefore, enhancing the efficiency of the dust deposition method through PPIOC dust spraying becomes a pressing challenge. The aim of this study is to investigate the impact of the Dry Fog technology, generating liquid droplets up to 20 µm in size, during the unloading stage of PPIOC at a mining and metallurgical enterprise in the precipitation of suspended fine-dust particles. The primary goal of this research was to assess the effectiveness and potential advantages of applying the Dry Fog technology for dust spraying with subsequent precipitation, as this technology has not been previously applied to PPIOC dust.
Materials and Methods. The experiment on the PPIOC dust deposition was conducted in a specially designed laboratory setup. Through physical modeling in the laboratory setup, parameters of the precipitation process were obtained. Subsequently, the results were analyzed to understand the dependence of dust precipitation over time, taking into account the influence of the Dry Fog technology. An experiment program was developed for physical modeling. According to the devised program, dust was uniformly loaded into the interior of the laboratory setup (from the top), distributed in the air stream throughout the volume of the setup by a fan, and an instrument located at the bottom recorded changes in concentration over time. Experiments on dust precipitation were then conducted using liquid spraying (filtered water as the liquid) introduced into the setup through nozzles generating droplets with sizes of 10 and 15 µm, concurrently with the loading of dust into the laboratory setup. The effectiveness of the Dry Fog technology in the deposition of PPIOC dust was determined visually and further analyzed based on a comparison of graphs. The dynamics of changes in the average dust concentrations depending on time was studied both during precipitation without spraying and using the Dry Fog technology. During the experiment, the characteristics of the microclimate inside the laboratory setup (humidity, temperature and air velocity) and the parameters of two nozzles — their operating pressure and the supplied liquid spraying time — were recorded.
Results. The comparison of the results showed a reduction in the dust precipitation time by 40 % and 75 % when using nozzles with sizes of 10 µm and 15 µm, respectively.
Discussion and Conclusion. The experiment results confirm the effectiveness of the Dry Fog technology for PPIOC dust precipitation during unloading at the mixing stage. Fundamental findings have been obtained, providing a basis for further assessment of the efficiency of dust precipitation with the additional application of pulsating ventilation. In such a combination, an additional 20–25 % increase in precipitation efficiency is anticipated compared to the results presented in this article. The obtained results will support the justification of rational parameters and the implementation of the described method in production to enhance dust precipitation efficiency. Additionally, they will aid in developing a methodology to accelerate the PPIOC dust precipitation using the pulsating ventilation method.

Keywords: ore dust, dust from iron ore concentrate preparation products, iron ore concentrate, liquid spraying, mass transfer, dust deposition experiment, liquid aerosol, dust aerosol, pulsating ventilation method

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the Editorial team of the journal and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations for improving the article. Additionally, the authors would like to thank the team and the head of the Technosphere Safety Department at NUST MISIS for their support in establishing the laboratory and conducting the research.

For citation. Kurnosov IYu, Filin AE, Tertychnaya SV. Assessment of the Spraying System Impact at the Preparation Stage of Iron Ore Concentrate Products. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):41–49. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-41-49

Введение. В целях снижения концентрации атмосферной пыли на участках производства в горно-металлургическом комплексе успешно применяются разнообразные инновационные методы и передовые технологии обеспыливания. Используют фильтрационные системы, циклоны и вентиляционные установки, специально разработанные для эффективного улавливания и удаления мельчайших частиц пыли [1–3]. Помимо этого, инженеры применяют методы жидкостного орошения, аэрофлотации и другие передовые технологии, которые совместно обеспечивают комплексный подход к решению проблемы запыленности. Эффективность предпринимаемых мер по обеспыливанию тесно связана с уникальными особенностями производственных процессов, характеристиками применяемого оборудования, конструктивными особенностями помещений и другими важнейшими факторами. Систематическая забота о техническом состоянии оборудования не просто является частью технологического процесса, а выступает важным элементом стратегии по снижению воздействия производственной деятельности на окружающую среду, способствует оптимизации производственной эффективности. Комплексное внедрение вышеперечисленных мероприятий — совмещение различных методов и технологий — позволяют достичь максимальной эффективности в уменьшении уровня пылевой нагрузки в пределах рабочей зоны.

На этапе разгрузки и подготовки железорудного концентрата, где формируется значительное количество мельчайшей дисперсной пыли, продолжительное время используется система жидкостного орошения [4–6]. Для создания мельчайшего жидкостного аэрозоля применяются разнообразные виды форсунок, образующих капли диаметром от 30 до 150 мкм. Помимо этого, используются форсунки и с более крупным диаметром. Время оседания t мельчайшей дисперсной пыли (d=1–10 мкм) при использовании таких форсунок может быть достаточно продолжительным и достигать 25 400 с (около 7 часов) [6]. На других этапах производства для эффективного пылеосаждения применяется передовая технология — «Сухой туман». В этой технологии используются форсунки меньшего диаметра, распыляющие жидкость с дисперсностью капель в диапазоне от 1 до 20 мкм [7]. В данной технологии каждая капля жидкости служит эффективным инструментом для захвата и обеспечения оседания самых мельчайших частиц, создавая уникальное сочетание технологии и инженерного искусства в борьбе с проблемой атмосферной запыленности.

Исследований, связанных с применением вышеописанной технологии для осаждения мелкодисперсной пыли при подготовке продуктов железорудного концентрата, ранее не проводилось. Поэтому целью данной работы был анализ воздействия технологии «Сухой туман», при которой генерируются капли жидкости размером до 20 мкм, на этапе разгрузки ППЖК горно-металлургического предприятия при осаждении взвешенной мелкодисперсной пыли. Задачей стала оценка эффективности и возможных преимуществ применения технологии «Сухой туман» для орошения пыли с последующим осаждением.

Материалы и методы. Для оценки эффективности инновационной технологии «Сухой туман» провели серию экспериментов пылеосаждения мельчайших частиц продуктов железорудного концентрата с использованием форсунок, имеющих диаметры 10 и 15 мкм. Для выполнения эксперимента был разработан лабораторный стенд (рис. 1). Данный стенд использовался для анализа осаждения угольной пыли в [8]. Он представляет собой кубическую емкость объемом 1 м^3, изготовленную из органического стекла в алюминиевой раме.

В роли средства для мониторинга концентрации частиц в атмосфере использовался высокоточный измеритель массовой концентрации аэрозольных частиц — АЭРОКОН-П. Данный измерительный прибор был разработан с учетом требований к определению массовой концентрации пыли с разнообразным происхождением и химическим составом. Измеритель массовой концентрации обладает уникальной способностью регистрировать дисперсность исследуемых частиц, включая те, которые имеют диаметр до 10 мкм.

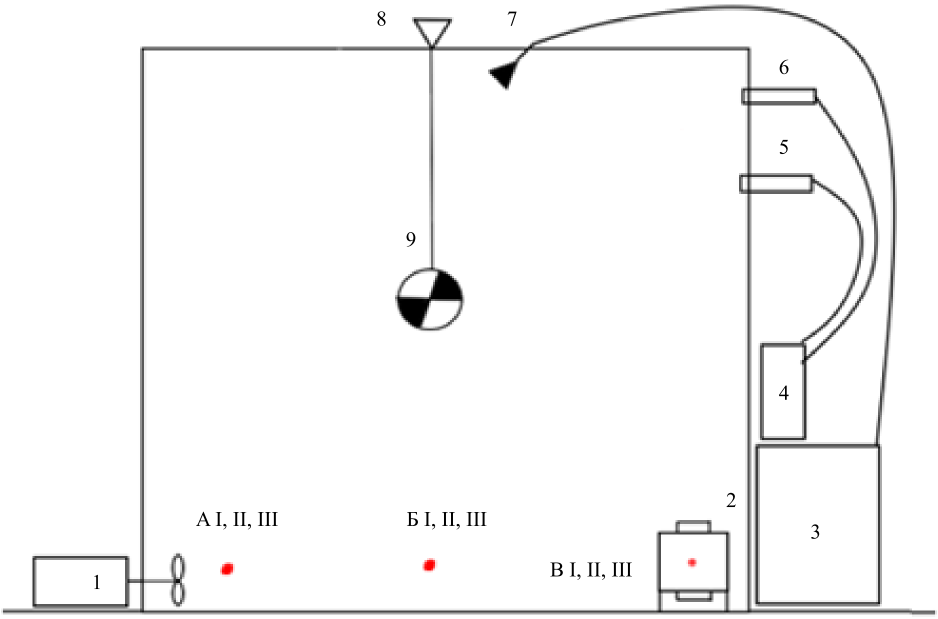


Рис. 1. Лабораторный стенд для осаждения пыли со схемой размещения оборудования и точками измерений: 1 — генератор воздушного потока; 2 — высокоточный измеритель массовой концентрации аэрозольных частиц — «АЭРОКОН-П»; 3 — генератор тумана; 4 — метеометр; 5 — датчик влажности; 6 — датчик температуры; 7 — форсунка; 8 — засыпная воронка; 9 — воздушный пульсатор

Порядок проведения измерений обозначены на рис. 1 буквами А, Б, В (расположение датчика Аэрокон-П) (2). Значения I, II и III (находящиеся рядом с буквами) соответствуют точкам проведения измерений. Согласно вышеописанной схеме, эксперимент проводился по всей площади дна лабораторного бокса, а именно в 9-и его точках (точки измерения I, II, III следует понимать, как располагаемые в перспективе, т.е. друг за другом).

Эксперименты по осаждению пыли производились при контроле параметров микроклимата. Данные параметры на момент проведения эксперимента по осаждению контролировались при помощи метеометра TESTO 435 (4). При проведении экспериментов по осаждению пыли метеометр использовался для контроля параметров пылевоздушной среды в лабораторном боксе — температуры и влажности воздуха. Это позволило установить начальные условия эксперимента и провести его в контролируемых условиях. Описанный выше измерительный прибор был задействован для мониторинга и поддержания влажности воздуха внутри стенда в пределах 25–30 % и температуры — в диапазоне от 22 °C до 25 °C. Оценка скорости движения воздушного потока, исходящего из генератора, проводилась с использованием цифрового крыльчатого анемометра, что обеспечивало стабильную скорость движения воздуха на уровне 4 м/с. Для моделирования системы орошения в лабораторном стенде использовалась установка E218, предназначенная для туманообразования посредством распыления жидкости из различных форсунок (рис. 1). Рабочее давление данной установки составляет 5,4 МПа, а максимальное — 12,41 МПа. Для эксперимента в данной установке использовались форсунки диаметром 15 мкм и 10 мкм (рис. 1).

Размеры частиц пыли, используемой при проведении эксперимента по осаждению, согласно гранулометрического анализа, находились в диапазоне от 1 мкм до 40 мкм (рис. 2). Поскольку прибор для регистрации концентрации частиц в воздухе измеряет частицы диаметром до 10 мкм, требовалось определить процентное содержание этих частиц в пробе пыли. Согласно данному анализу, требуемый размер частиц пыли, используемый для проведения эксперимента по осаждению, составляет примерно 10 % от 1 грамма навески, используемой при анализе пыли [9]. Для корректного определения прибором изменения концентрации навеска исследуемой пыли была увеличена до 5 грамм с целью повышения концентрации мелкодисперсной пыли с диаметром от 1 мкм до10 мкм.

Эксперимент по осаждению пыли был реализован в лабораторном стенде, описанном ранее, с соблюдением всех параметров микроклимата, регулируемых соответствующими измерительными устройствами. Заданное количество пыли массой $m = 5$ г вводилось в объем лабораторного бокса в течение 3–5 секунд с использованием засыпной воронки (рис. 1). Во время этого процесса генератор воздушного потока был активирован, обеспечивая подачу воздуха со скоростью $V = 4$ м/с. Измерительное устройство АЭРОКОН-П, используемое в роли измерителя массовой концентрации аэрозольных частиц, периодически регистрировало данные о концентрации пыли с интервалом в 5 секунд, автоматически передавая полученные значения на

монитор компьютера [10]. Этап эксперимента по осаждению пыли завершался в момент достижения значения концентрации пыли, зарегистрированного прибором, равным $n = 0{,}00$ мг/м³. Достижение данного значения считалось индикатором завершения эксперимента, при котором весь пылевой материал в лабораторном боксе считался осевшим.

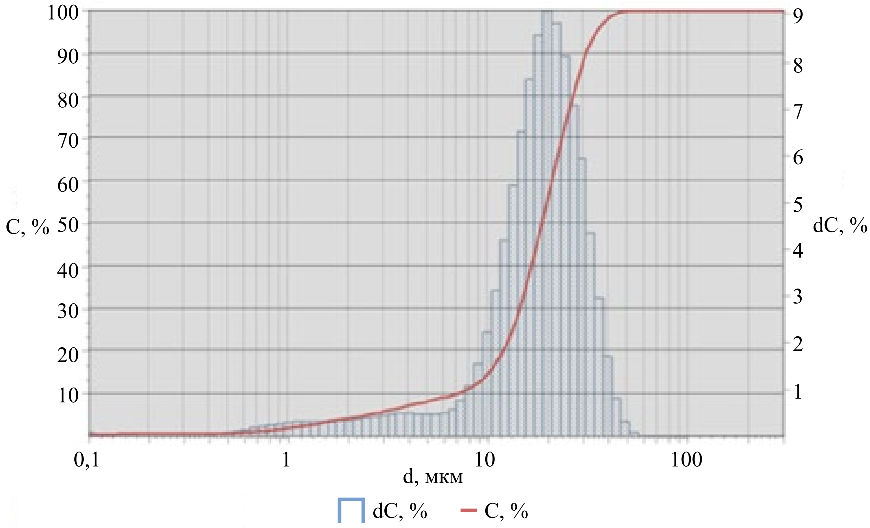


Рис. 2. Гранулометрический анализ пыли агломерационного производства горно-металлургического комплекса:
C — процентное распределение количества частиц в пробе по размерам, %;
dC — интегральное распределение процентного количества частиц в пробе по размерам, %;
d — размер частиц в пробе

Используя аналогичные параметры температуры, влажности и скорости движения воздуха при проведении эксперимента по пылеосаждению, исследования осаждения пылеводяного аэрозоля проводились при поочередном использовании 2-х форсунок (d = 10 и d = 15 мкм) и контроле подаваемого давления (p = 5,4 МПа) жидкости. Помимо этого, осуществлялся контроль времени распыления t = 2 мин (по истечению 2 мин влажность воздуха в лабораторном стенде становится максимальной и составляет 98,5 %).

Результаты исследования. В описанных условиях для обеспечения достоверности экспериментальных данных была выполнена серия из 10 экспериментов по осаждению пыли. Результаты данных экспериментов были обработаны, сведены в графики и проанализированы. Графики изменения значений концентрации пыли с течением времени при проведении 10 экспериментов от времени осаждения приведены на рис. 3.

В соответствии с графиком, представленном на рис. 3, среднее время осаждения пыли при отсутствии орошения и использовании пульсирующей вентиляции составляет в среднем 1 828 секунды (30,5 минуты). В течение этого времени пыль в условиях производства находится в воздухе рабочей зоны и наносит вред не только оборудованию, но и персоналу предприятия.

Результаты 10 экспериментов по осаждению пылеводяного аэрозоля с использованием 2-х форсунок также были представлены в виде графиков динамики изменения средних значений концентрации от времени осаждения аэрозолей (рис. 4, 5).

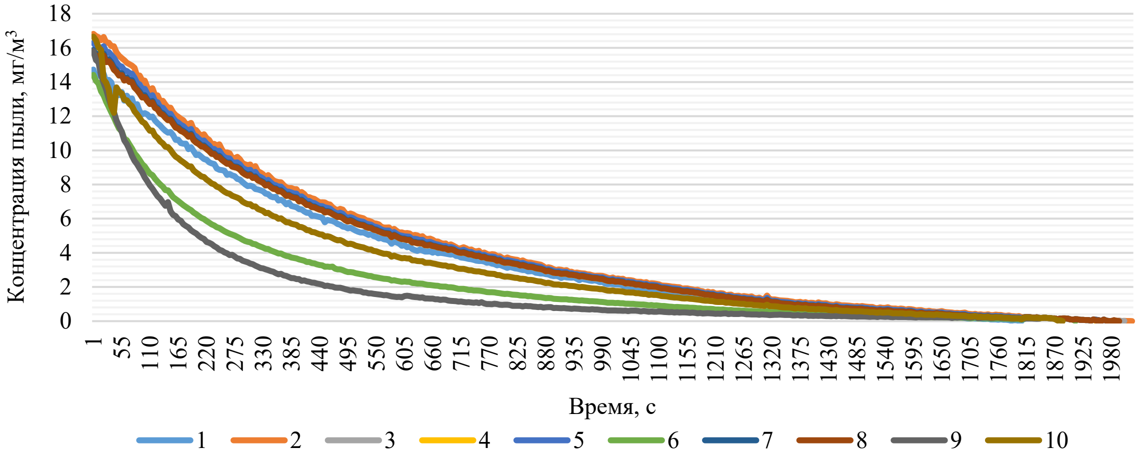


Рис. 3. Графики изменения концентрации пыли от времени по результатам 10 экспериментов

Согласно графикам, представленным на рис. 4, среднее значение времени осаждения пылеводяного аэрозоля при использовании форсунок диаметром 10 мкм, составляет 1115 с (18,5 мин). Эффективность данного способа, относительно времени самоосаждения пыли, составляет порядка 40 %. Однако, согласно рис. 5, при использовании форсунки диаметром 15 мкм, среднее время осаждения пылеводяного аэрозоля составляет 475 с (≈ 8 мин.). Эффективность данного способа составляет 74 %.

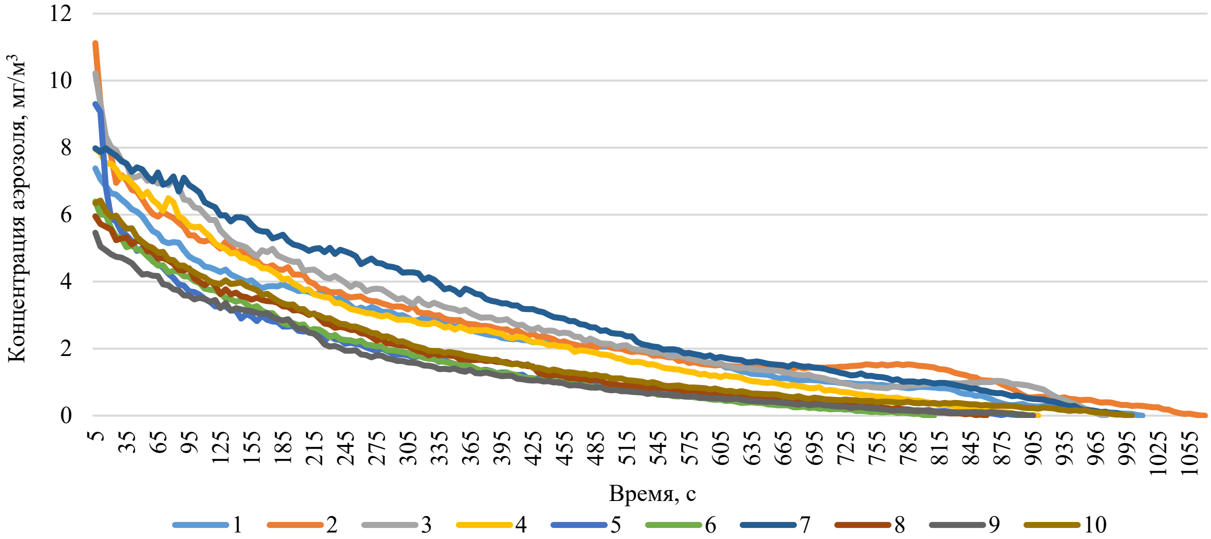


Рис. 4. Графики изменения концентрации пылеводяного аэрозоля от времени (диметр форсунки 10 мкм)

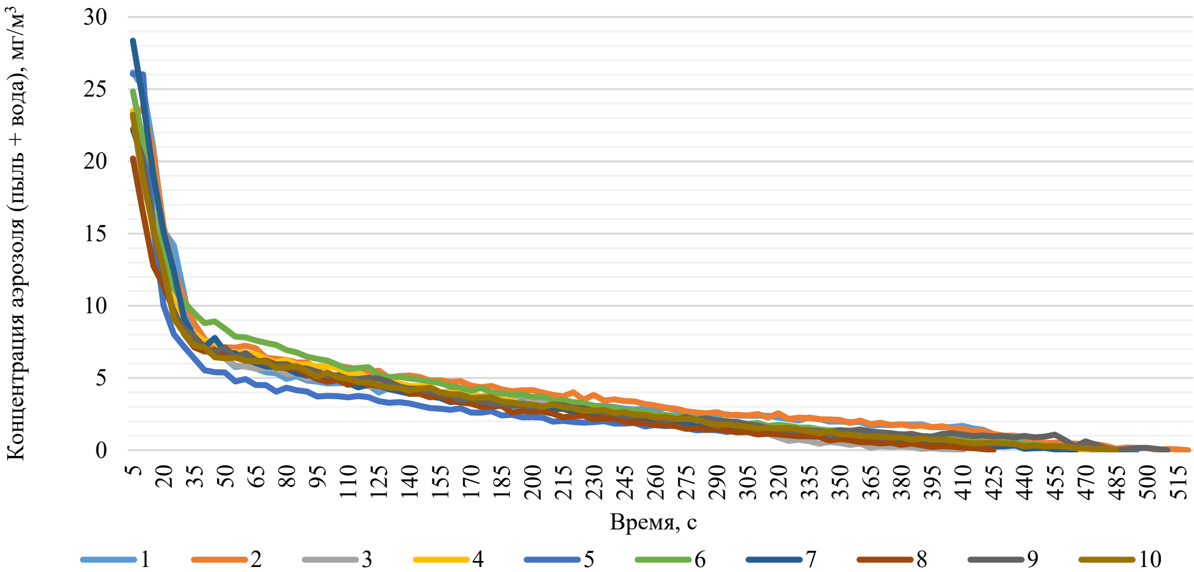


Рис. 5. Графики изменения концентрации пылеводяного аэрозоля от времени (диметр форсунки 15 мкм)

На рис. 6 представлены пересчитанные зависимости концентрации аэрозолей, полученные в результате экспериментов по орошению с использованием форсунок диаметром 10 мкм и 15 мкм. В ходе экспериментов были обнаружены разные концентрации пыли, которые были зарегистрированы прибором. Для удобства представления эти концентрации были пересчитаны и выражены в виде процентного соотношения, зависящего от времени осаждения.

При сравнении определенных ранее значений эффективности осаждения пыли с применением форсунок на 10 и 15 мкм, последние дают значительный эффект. С применением форсунки на 15 мкм значение эффективности осаждения пыли примерно в 2 раза выше, чем с форсункой на 10 мкм. При использовании форсунки на 15 мкм частицы пыли проявляют низкую склонность к слипанию между собой и менее эффективно формируют капли жидкости больших размеров, что снижает эффект «конденсата» в процессе орошения. Мелкодисперсные капли лучше заполняют пылевоздушную среду и могут использоваться в тех местах технологического производства, где капли больших размеров могут нанести ущерб.

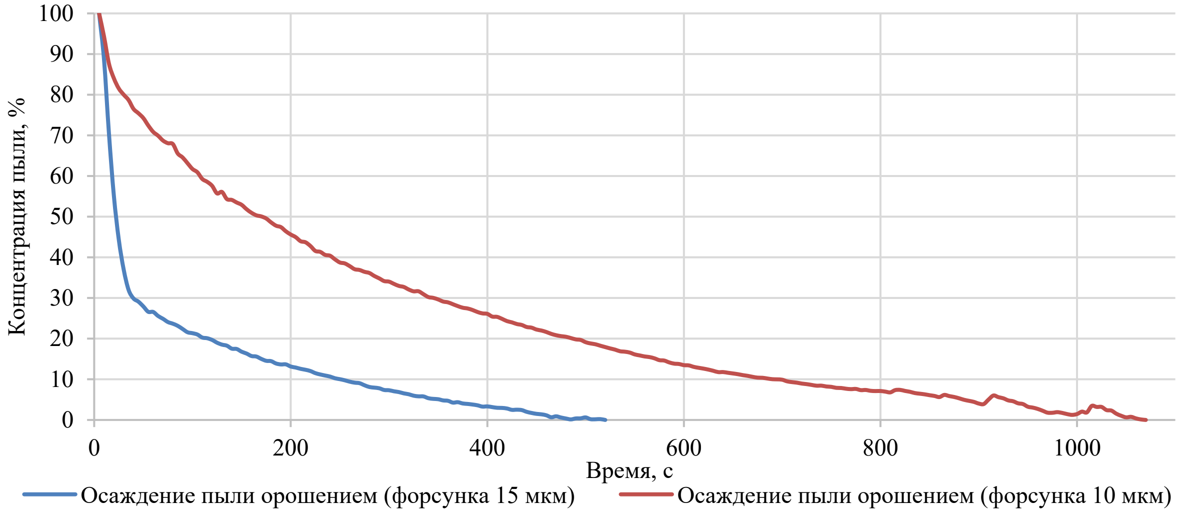


Рис. 6. График изменения концентраций пыли (%) от времени в условиях пылеосаждения орошением при применении форсунок с диметрами 15 мкм и 10 мкм

Обсуждение и заключение. В результате проведенных экспериментов по осаждению пыли в лабораторном стенде было установлено время осаждения пыли при двух различных сценариях: при естественном осаждении пыли и при осаждении пылеводяного аэрозоля (путем воздействия жидкостного аэрозоля с использованием форсунок диаметром 10 и 15 мкм).

В дальнейшем для разработки методики по осаждению пыли необходимо использовать следующие параметры, как рациональные:

– влажность воздуха внутри лабораторного — φ = 25–30 %;

– температура воздуха в лабораторном стенде — T = 22–25 °C;

– скорость движения воздуха, создаваемая генератором воздушного потока, должна быть на уровне V=4 м/с.

Также следует использовать следующие технические параметры системы орошения:

– для рассеивания жидкости рекомендуется использовать форсунки с диаметрами 10 мкм и 15 мкм;

– рабочее давление в системе подачи жидкости — p = 5,4 МПа;

– время распыления аэрозоля жидкости — 2 мин.

Полученные результаты показывают разные значения эффективности осаждения пыли с применением форсунок, генерирующих разные диаметры капель, применяемых в процессе орошения. Описанные в статье форсунки демонстрируют значительное улучшение процесса пылеосаждения орошением при использовании форсунок на 10 и 15 мкм, нежели при использовании в процессе орошения форсунок, генерирующих капли размером больше 15 мкм [7]. Кроме этого, уменьшение количества влаги в воздушной среде производственных цехов будет оказывать меньшее негативное воздействие на оборудование.

Анализ полученных данных подтвердил более высокую эффективность процесса осаждения пыли при использовании технологии «Сухой туман» во время разгрузки ППЖК на этапе смешивания. Полученные результаты предоставляют основу для дальнейшей оценки эффективности процесса осаждения пыли уже при использовании метода пульсирующей вентиляции. Ориентируясь на работы других авторов, использующих данную технологию [7], прогнозируется дополнительное повышение значений эффективности осаждения на 20–25 %, относительно применения технологии «Сухой туман». Полученные в данной работе результаты будут использованы при разработке в дальнейшем методики осаждения пыли продуктов железорудного концентрата с использованием метода пульсирующей вентиляции.

Полученные значения показателей эффективности технологии «Сухой туман» дают основание рекомендовать его для внедрения на производстве для осаждения пыли на участках горно-металлургических производств с высокой пылевой нагрузкой.

Список литературы

1. Калимулина Е.Г., Темников В.В. Утилизация пылей аспирации сталеплавильного производства в АО «ЕВРАЗ НТМК» *Черные металлы*. 2018;(7):38–40.

2. Казюта В.И. Очистка газов ферросплавных печей в рукавных фильтрах. *Сталь*. 2022;(4):51–61.

3. Петров Г.В., Фокина С.Б. Повышение промышленной и экологической безопасности электросталеплавильного производства на основе переработки отвальных цинксодержащих пылей. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017;(S5–2):277–285.

4. Кочетов О.С., Отрубянников Е.В. Форсуночный скруббер для очистки газов от пыли и химических вредных веществ. В*: Труды международной научно-практической конференции инновационный путь развития как ответ на вызовы нового времени Магнитогорск, 20 сентября 2021 года.* Уфа: Аэтерна; 2021. С. 48–49.

5. Сницерева В.П., Козлова Л.О. Источники пылеобразования и комплексное обеспыливание на Жезказганских обогатительных фабриках. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* 2021;(S1–1):38–46. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_1_1_38

6. Cecala A.B., O'Brien A.D. *Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing.* CreateSpace Independent Publishing Platform; 2015. 312 p.

7. Chaulya S.K., Chowdhury A., Sunil Kumar, Singh R.S., Singh S.K., Singh R.K., et al. Fugitive dust emission control study for a developed smart dry fog system. *Journal of Environmental Management.* 2021;(285):112116. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112116

8. Филин А.Э., Курносов И.Ю., Колесникова Л.А., Овчинникова Т.И., Колесников А.С. К вопросу моделирования процесса осаждения пыли для условий угольной шахты. *Уголь.* 2022;9(1158):67–72. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-67-72

9. Красилова В.А., Эпштейн С.А., Коссович Е.Л., Козырев М.М., Ионин А.А. Разработка методики измерений гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции. *Горный информационно-аналитический бюллетень* (научно-технический журнал). 2022;(2):5–16. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_5

10. Сухих Е.А., Крылов А.А., Смольникова А.И., Антипьева М.В., Уланова Т.С. Методы определения респирабельных фракций мелкодисперсных частиц в воздушной среде. В: *Труды международной научно-практической конференции «Здоровье и окружающая среда» Минск, 19–20 ноября 2020 года.* Минск: Белорусский государственный университет; 2021. С. 454–457.

References

1. Kalimulina EG, Temnikov VV. Utilization of aspiration dusts in steelmaking production at “EVRAZ NTMK” JSC. *Chernye metally.* 2018;(7):38–40. (In Russ.).

2. Kazyuta VI. Clearing ferroalloy furnaces’ gases in bag filters. *Stal'.* 2022;(4):51–61. (In Russ.).

3. Petrov GV, Fokina SB. Increase of industrial and ecological safety of electrosteel-smelting production on the basis of processing of zinc-containing dump dusts. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2017;(S5–2):277–285. (In Russ.).

4. Kochetov OS, Otrubyannikov EV. Forsunochnyi skrubber dlya ochistki gazov ot pyli i khimicheskikh vrednykh veshchestv. In: *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Innovatsionnyi put' razvitiya kak otvet na vyzovy novogo vremeni Magnitogorsk, September 20, 2021.* Ufa: Aeterna; 2021. P. 48–49. (In Russ.).

5. Snitsereva VP, Kozlova LO. Sources of dust formation and integrated dusting at zhezkazgan concentrating factories. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal).* 2021;(S1–1):38–46. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_1_1_38 (In Russ.).

6. Cecala AB, O'Brien AD. *Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing.* CreateSpace Independent Publishing Platform; 2015. 312 p.

7. Chaulya SK, Chowdhury A, Sunil Kumar, Singh RS, Singh SK, Singh RK, et al. Fugitive dust emission control study for a developed smart dry fog system. *Journal of Environmental Management.* 2021;285:112116. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112116

8. Filin AE, Kurnosov IYu, Kolesnikova LA, Ovchinnikova TI, Kolesnikov AS. Description of the methodology for conducting an experiment on dust deposition of mining and metallurgical production. *Ugol'.* 2022;9(1158):67–72. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-67-72 (In Russ.).

9. Krasilova VA, Epshtein SA, Kossovich EL, Kozyrev MM, Ionin AA. Development of method for coal dust particle size distribution characterization by laser diffraction. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal).* 2022;(2):5–16. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_5 (In Russ.).

10. Sukhikh EA, Krylov AA, Smol'nikova AI, Antip'eva MV, Ulanova TS. Metody opredeleniya respirabel'nykh fraktsii melkodispersnykh chastits v vozdushnoi srede. In: *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Zdorov'e i okruzhayushchaya sreda" Minsk, November 19–20, 2020.* Minsk: Belarusian State University; 2021. P. 454–457. (In Russ.).

Поступила в редакцию 10.11.2023
Поступила после рецензирования 05.12.2023
Принята к публикации 12.12.2023

Сведения об авторах:

Илья Юрьевич Курносов, аспирант, ассистент кафедры техносферной безопасности Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119049, РФ, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4), SPIN-code: 5258-2876, ORCID, kurnosovilya@yandex.ru

Александр Эдуардович Филин, доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119049, РФ, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4), SPIN-code: 2093-0680, ORCID, aleks_filin@bk.ru

Светлана Вячеславовна Тертычная, кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119049, РФ, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4), ResearcherID, SPIN-code: 2956-1736, ORCID, svetter@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

И.Ю. Курносов — проведение эксперимента, толкование логики полученных данных, формирование основанного текста статьи, обработка результатов исследования, перевод на иностранный язык.

А.Э. Филин — постановка задачи и цели исследования, предоставления научной базы и формирование методики эксперимента, контроль результатов эксперимента и формирование обоснования теории исследования.

С.В. Тертычная — обработка литературных источников, предоставление научной базы, формирование выводов исследования, редактирование текста и графиков рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 10.11.2023
Revised 05.12.2023
Accepted 12.12.2023

About the Authors:

Ilya Yu. Kurnosov, Post-graduate student, Assistant of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology (MISiS) (4, Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, RF), SPIN-code: 5258-2876, ORCID, kurnosovilya@yandex.ru

Aleksandr E. Filin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology (MISiS) (4, Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, RF), SPIN-code: 2093-0680, ORCID, aleks_filin@bk.ru

Svetlana V. Tertychnaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology (MISiS) (4, Leninskiy Prospekt, Moscow, 119049, RF), ResearcherID, SPIN-code: 2956-1736, ORCID, svetter@mail.ru

Claimed contributorship:

IYu Kurnosov: conducting the experiment, interpreting the logic of the data obtained, creating the basis for the article, analyzing the research results, translating into a foreign language.

AE Filin: setting the goals and objectives of the study, providing a theoretical basis and developing the methodology for the experiment, monitoring the results of the experiment and justifying the theory behind the research.

SV Tertychnaya: processing of literary sources, providing a scientific base, forming research conclusions, editing the text and graphs of the manuscript.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.